

補助事業番号 2021M-226
補助事業名 2021年度 高速炉における液体ナトリウム配管内部可視化のための
真空紫外レーザーの開発とナトリウム流動解析 補助事業
補助事業者名 広島大学大学院 先進理工系科学研究科プラズマ基礎科学研究室 難波慎一

1 研究の概要

液体ナトリウムは金属であるが、波長216 nm以下の真空紫外域の光に対して透明、という驚くべき光学的特性を持っています。この特異な性質に着目し、本事業ではまずコヒーレント真空紫外レーザーを開発しました。次にこの波長の短いレーザーを光源とする粒子画像流速計法(PIV法)によりナトリウムの流れ場解析も行いました。実施する具体的な研究内容、開発する上での数値目標を以下に示します。

- (1) 真空紫外波長域のパラメトリック増幅による高次高調波の発生申請者らの独自技術であるパラメトリック増幅により真空紫外域の高出力高次高調波(波長:114 nm 9次), 160 nm (7次), パルス幅:40 fs以上, 出力: 30 μ J以上)を発生
- (2) プラズマ励起真空紫外レーザーを実現するため、過渡的電子衝突励起法を用いたプラズマ励起型真空紫外レーザー(波長121 nm単色, パルス幅: 10 ps, 出力: 50 μ J以上)を発振
- (3) 真空紫外レーザーを用いたPIV法によるナトリウムの可視化とネオン原子をトレーサー粒子とした2光子レーザー共鳴吸収分光のイメージを相互相関PIV法で解析し、ナトリウム蒸気の流れを可視化し、高精度に流れ場の構造を調査できる、新しいナトリウム診断法を開発

2 研究の目的と背景

高速増殖炉はもんじゅのナトリウム漏洩とそれに起因する火災の隠蔽の不祥事を起こし、その後も度重なる重大な不備等で発電することなくシャットダウンしました。一方、2018年に閣議決定された第5次エネルギー基本計画では、高速炉の実用化に向けた研究開発は継続することが明記されており、もんじゅで起きた冷却材ナトリウムの漏洩事故を防止する監視システムの開発が急務の課題の一つとして挙がっています。また、日米共同で小型・安全性の高い高速炉を開発する計画も立ち上がっており、そのためにも液体ナトリウムの取扱い・異常検知システムの構築が極めて重要とされています。

本事業では、3つの課題に研究を分類してそれぞれの課題の目標値を設定して実施しました。具体的には、(1) 真空紫外域の高出力高次高調波(波長:114 nm 9次), 160 nm (7次), パルス幅:40 fs以上, 出力: 30 μ J以上)の発生、(2) 過渡的電子衝突励起法を用いたプラズマ励起型真空紫外レーザー(波長121 nm 単色, パルス幅: 10 ps, 出力: 50 μ J以上の発振)、(3) 真空紫外レーザーを用いたPIV法によるナトリウム流動の可視化と高精度に流れ場の構造を調査できるナトリウム診断法の開発、を目的としています。

3 研究内容

- (1) 真空紫外域における高次高調波の発生
(<https://www.plasmasciencelab.com/research>)

超短パルス高強度レーザーを貴ガスに照射すると、入射したレーザー光の1/奇数数の光子エネルギーを持った指向性のいい光が放出されます。これは高次高調波と呼ばれています。本研究では高出力の高調波(次数:9次, 波長: 114 nm)を発生させることを行いました。図1は高調波を発生させる超短パルス高強度レーザー

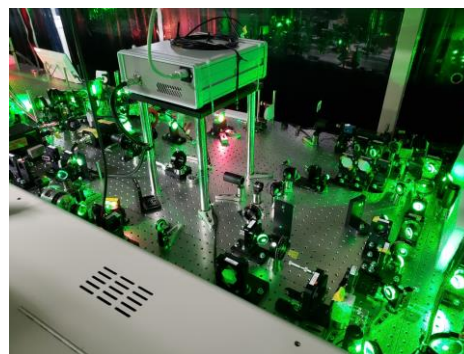


図1 超短パルス高強度レーザーの写真。

一を、図2には発生した114nmの高次高調波の分光スペクトル(横軸波長, 縦軸空間位置の画像)を示します。第9次高調波が非常に強く発生していることが分かります。この真空紫外光を用いて液体ナトリウムの流れ場解析を行います。なお、通常の可視光ではナトリウムに対して不透明であるため、可視域高調波を使うことができないため、ナトリウム計測には真空紫外光は非常に強力なツールとなります。

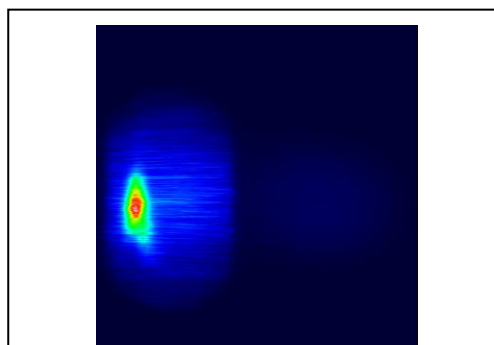


図2 114nmの高次高調波スペクトル.

(2) プラズマ励起真空紫外レーザーの開発

(<https://www.plasmasciencelab.com/research>)

プラズマは数万度以上の物質状態で、原子や分子から電子が剥ぎ取られたため、地上では観測ができないようなさまざまな現象が出現します。その一つが反転分布と呼ばれるもので、この現象を用いるとレーザー発振が起こります。本研究では過渡的電子衝突励起法と呼ばれる方法を用いて非常に温度密度が高いプラズマを発生させ、その中で極短時間反転分を形成させます。すると、真空紫外レーザーが発振します。本研究ではアルミプラズマを超短パルス高強度レーザーで照射してこの状態を作り出します。輻射流体シミュレーション、量子論に基づく数値計算を駆使することにより、レーザー発振に最適な条件を模索し、実験を行いました。

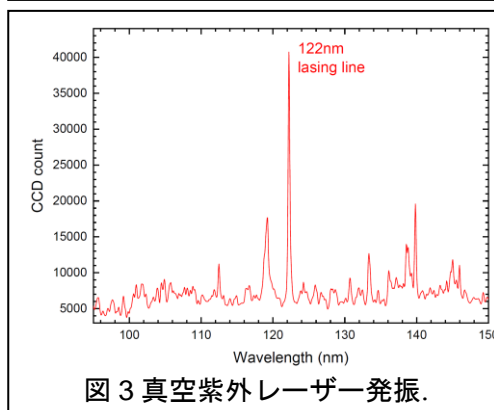


図3 真空紫外レーザー発振.

その結果、微弱ながらも波長122nmの発振線と思われるスペクトル観測に成功しました。

(3) 金属ナトリウムの透過率の評価

(固体ナトリウムは空気中の水分と反応すると激しく燃えます。したがってナトリウムを液化するには水分のない環境にてヒーターによる加熱(ナトリウムの融点は98°Cです)が必要となります。本研究ではまず金属ナトリウムが120 nm波長域で透明であることにあります。そのため金属ナトリウム板をMgF₂窓(2 mm厚+1 mm厚)で挟み込み、ここに真空紫外光を照射して金属ナトリウムの透過率を計測しました。この窓付金属ナトリウム板の製作は水分がないアルゴン雰囲気中のグローブボックス内で行うという危険な作業が伴います。

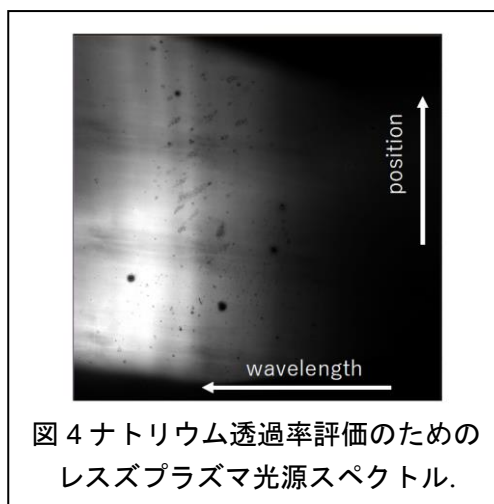


図4 ナトリウム透過率評価のための cesium プラズマ光源スペクトル.

実験で用いたレーザー生成スズプラズマの波長120 nm付近のスペクトルを図4に示します。ここに金属ナトリウム板を通すことにより真空紫外光がナトリウム内でどの程度吸収されるのかが分かります。実験の結果、透過率は120 nm付近で0.3程度であることが分かりました。

理論的には0.6程度と言われていますが、半分程度まで透過率が低下したのは表面の水分と金属ナトリウムが反応してしまったためと考えられます。したがって、水分がほとんどない環境下での実験が求められます。一連の研究を通じて、本研究の最終目的であるナトリウムを真空紫外光で可視化することができることを実証しました。

(4)PIV法による液体ナトリウムの流れ計測

液体ナトリウムは透明でないため、配管を流れるナトリウム内部を観測することができません。つまり、配管内の機器に異常が起こっても検知する手段がありませんでした。本研究では上記で記したように液体ナトリウムが真空紫外光に対して透明である特性を活かし、配管内の異常検知システムを構築するための予備実験を行いました。実験はダブルジャケット式の真空用器内の内側容器の中にナトリウムを入れ、ヒーター加熱することにより液化しました。温度の空間分による熱対流でナトリウム内に設置した突起物周りの流れ場を計測することを試みました。しかしながら、ナトリウム容器内に不純物である水分がナトリウムと反応し、その反応生成物が窓材に付着し、内部の可視化を阻害することが分かりました。今後は容器内の水分を極限まで減らした環境下で実験を行い、ナトリウムの流れ場観測を行う予定です。

4 本研究が実社会にどう活かされるか—展望

高速増殖炉は“もんじゅ”のナトリウム漏洩とそれに起因する火災を隠蔽し、その後も度重なる不祥事で発電することなく2016年に廃炉となりました。一方、2018年に閣議決定された第5次エネルギー基本計画では、高速炉の実用化に向けた研究開発は継続することが明記されており、もんじゅで起きた冷却材ナトリウムの漏洩事故を防止する監視システムの開発が急務の課題となっています。

また、日米共同で高速炉を開発する計画も進行しており、この際にも液体ナトリウムの取扱い・異常検知システムの構築が極めて重要と認識されていますが、未だ有効な解決策はありません。

本研究で実施した内容は、液体ナトリウム流動をPIV法により計測し、配管内部の異常をその場観測できるという革新的技術です。世界におけるエネルギー供給の爆発的増加に伴う化石燃料の枯渇問題、地球温暖化を抑制するカーボンニュートラル社会の実現を見据え、高速増殖炉を早期に実現することは先進国に課された責務となっています。本事業で得られた基盤要素技術は、高速炉を安全/安心なものとするためには不可欠なものであり、成功した際の当該分野への波及効果は計り知れないと言えます。

5 教歴・研究歴の流れにおける今回研究の位置づけ

研究代表者である難波はこれまで20年近く国内外の研究施設で、高次高調波の高出力化に関する研究、プラズマ励起X線レーザー開発に従事してきました。これらの光源応用例のひとつが、本研究で対象とする高出力真空紫外光を光源とするPIV法による液体ナトリウム流動解析です。これまでの光源開発の知識が十分発揮でき、その応用が実社会に大きく貢献できるという意味で、研究の視野・裾野が広がると考えています。

6 本研究にかかわる知財・発表論文等

【発表論文】

“Enhancement of Gain Coefficient of Li-Like Ion 3d-4f Soft X-ray Laser Oscillation by a Single Resonator”, Shinichi Namba, Jiahao Wang, Hikari Ohiro, Jiawei Zhang, Maki Kishimoto, Kotaro Yamasaki, Noboru Hasegawa, Thanhhung Dinh, Masahiko Ishino, Takeshi Higashiguchi and Masaharu Nishikino, *Atoms*, 10, 128, (2022).

【招待講演】

Demonstration of 122-nm VUV laser by means of a transient collisional excitation scheme, S. Namba, J.H. Wang, K. Yamasaki, T. Johzaki, A. Sunahara, T. Kawamura, S. Mochizuki, T. Higashiguchi, T.-H. Dinh, N. Hasegawa, M. Nishikino, and T. Kawachi 26 Sept-1Oct, 2021, APPS-DPP conference, Remote e-conference.

7 補助事業に係る成果物

(1)補助事業により作成したもの

なし

(2)(1)以外で当事業において作成したもの

なし

8 事業内容についての問い合わせ先

所属機関名： 広島大学大学院先進理工系科学研究科

(ヒロシマダイガクダイガクインセンシンリコウケイカガクケンキュウカ)

住 所: 〒739-8527

広島県東広島市鏡山1-4-1

担 当 者: 教授 難波慎一(ナンバシンイチ)

担 当 部 署: プラズマ基礎科学研究室(プラズマキソカガクケンキュウシツ)

E - m a i l : namba@hiroshima-u. ac. jp

U R L : <https://www.plasmasciencelab.com>